

单相浸没冷却数据中心的多尺度模型研究

唐于晴¹, 王占军², 胡孝俊², 宫小明¹, 方文振¹, 陶文铨¹

(1. 西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安;

2. 中讯邮电咨询设计院有限公司, 100048, 北京)

摘要: 针对传统冷却方法难以有效应对数据中心高功率密度散热需求,以及局部热点问题易导致设备性能下降和可靠性降低等问题,提出并发展了数据中心单相浸没液冷多尺度数值模型。首先,由单相浸没服务器详细模型得到服务器阻力曲线;然后,利用边界条件在不同层级间的传递方式,构建单相浸没冷却数据中心的多尺度仿真模型;最后,采用准确性经过验证的多尺度模型,研究了不同浸没腔体流量分配方式对多尺度模型的影响。数值结果表明:所构建的模型显著降低了计算复杂性和资源要求;相较于异侧出入口方式,采用分配腔+分配歧管方式,得到的流量分配不均匀性降低了74.67%,芯片节点温度降低了3.71℃;芯片节点温度随腔体进口液体温度呈正比线性变化,与腔体入口速度呈负增长关系,实现了数据中心浸没腔体级到芯片级完整的仿真链路。

关键词: 数据中心;单相浸没冷却;多尺度模型;流量分配;芯片节点温度

中图分类号: TK124 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtub202511007 **文章编号:** 0253-987X(2025)11-0073-11

Multiscale Modeling of Single-Phase Immersion Cooling in Data Centers

TANG Yuqing¹, WANG Zhanjun², HU Xiaojun², GONG Xiaoming¹,

FANG Wenzhen¹, TAO Wenquan¹

(1. School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. China Information Technology Designing & Consulting Institute Co., Ltd., Beijing 100048, China)

Abstract: To address the challenges traditional cooling methods face in effectively managing the high power density heat dissipation demands of data centers, as well as issues such as local hotspots that can lead to decreased equipment performance and reliability, a multiscale numerical model for single-phase immersion cooling in data centers is proposed and developed. First, resistance curves for servers are derived from detailed models of single-phase immersion servers. Then, a multiscale simulation model for single-phase immersion cooling in data centers is constructed through transferring boundary conditions across different levels. Finally, the effects of different flow allocation methods in immersion chambers on the multiscale model are studied using the validated multiscale model. Numerical results indicate that the constructed model substantially reduces computational complexity and resource requirements. Compared to the "opposite-side inlet-outlet" method, the use of a "distribution chamber + manifold" method leads to a 74.67% reduction in flow distribution unevenness and a chip node temperature drop of 3.71℃.

收稿日期: 2025-02-18。 作者简介: 唐于晴(1995—),女,博士生;陶文铨(通信作者),男,教授,博士生导师,中国科学院院士。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52206110)。

网络出版时间: 2025-04-08

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/61.1069.t.20250407.1118.004>

Moreover, the chip node temperature is proportional to the inlet liquid temperature of the chamber and inversely related to the inlet liquid velocity, thus achieving a complete simulation chain from the immersion chamber level to the chip level in data centers.

Keywords: data center; single-phase immersion cooling; multiscale model; flow distribution; chip junction temperature

信息技术领域的快速发展给计算领域带来了新的挑战^[1-2]。数据中心的冷却能源需求在过去几年中显著增长^[3]。预计到 2030 年,数据中心的能源消耗将占全球电力生产的 13%^[4],其中总能耗的 30%~50%用于冷却^[5]。因此,快速有效地冷却服务器已成为数据中心的首要任务。目前,大多数数据中心仍然依赖传统的空气冷却方法,但已无法满足日益增长的冷却需求^[6]。液体冷却技术具有较强的热传递能力,使得其在数据中心的应用中日益受到关注。

在单相浸没液体冷却中,将服务器浸入一个密封腔体,与腔体中的冷却流体进行热传递。冷却流体在整个冷却过程中保持液态,然后热流体被推到腔体外部的热交换器进行冷却,最后再循环回到储罐中^[7]。单相浸没液冷能够支持更高的计算密度,有能力从密集打包的服务器中移除更多的热量,确保设备在高密度环境下的稳定运行。Pambudi 等^[8]的研究表明,入口温度为 45℃ 时,数据中心电能使用效率(PUE)最低达到 1.03。Qiu 等^[9]、冯帅等^[10]以及 Sun 等^[11]的研究也证实了浸没式液冷相较于传统冷却方式的优越性。

在基于浸没冷却散热原理的研究中,Chhetri 等^[12]采用回归模型,建立了浸没条件下芯片温度、功耗和流体流量之间的回归方程。Lionello 等^[13]结合实验研究,计算了浸没冷却过程各组件的能量传递和功率耗散。在系统优化方面,Huang 等^[14]建立了一个单服务器三维数值模型,发现使用泵驱动模式时,冷却液的平均温度和中央处理器(CPU)的峰值温度分别降低了 55.5%、40.0%,且 PUE 降低了 11.6%。Kuncoro 等^[15]采用田口方法,研究了进出口位置、入口速度对 CPU 温度的影响。关于结构和流动路径的优化,Cheng 等^[16]研究了液体冷却剂在 3 种不同循环速度下单相浸入式冷却系统的冷却效果,观察到在低流量下冷却液停滞且热传递不均匀。Qi 等^[17]在服务器中添加带有长槽和方孔的流量分配器,结果表明,流量分配器使热点最大温度比无流量分配器的模块低 4~8℃。Pambudi 等^[8]在不同强制对流流量下对两种类型的电介质液体展开

浸没冷却实验研究,表明浸没冷却的温度比传统冷却方法低 13℃。

上述研究均基于较少(少于 5 个)浸没服务器的浸没冷却研究,而在实际液冷数据中心,为了提高冷却的功率密度,通常一个浸没腔体包含的服务器个数均大于 10。当研究对象从 1 个浸没腔中的少量(少于 5 个)服务器扩展到大规模部署时,将有以下影响:①由于服务器数量增多,造成发热量增大且腔体内部散热功耗分布不均,从而导致温度分布不均匀,更易形成局部热点;②服务器增多使得冷却液流动分布不均匀性增大;③为了提升系统冷却的功率密度和空间利用率,各服务器之间在腔体中的间隔距离通常为 5 cm,因此当服务器个数增多时,各服务器散热的交互影响不能忽略,温度场和流场耦合作用更加复杂。以上这些因素使得传统的基于少量服务器的研究结论难以直接推广到实际大规模应用场景中。

在对多个服务器浸没腔体的研究中,Liu 等^[18]将服务器简化为多孔介质模型,对液冷腔体单相浸没冷却性能进行优化和综合评价的数值研究。Li 等^[19]对液冷腔体性能开展实验研究,探讨了入口温度、冷却液流量和服务器负载比对液冷腔体性能的影响。液冷数据中心与风冷数据中心多尺度模型类似^[20],由于长度变化范围较大,其冷却过程在几何学上具有多尺度的特点,一般分为芯片尺度、服务器尺度、浸没腔体尺度。数据中心的运行导致几乎所有的电能都转化为热能,且数据中心冷却系统也呈现出明显的多尺度特性。因此,为降低数据中心的冷却能耗,需要建立多尺度模型,进一步考虑服务器内部芯片产生的热量如何被浸没腔体的冷量冷却。

本文由数据中心液冷服务器详细三维模型的仿真结果,得到数据中心服务器的相关参数,从而构建数据中心液冷浸没腔的散热模型,完成数据中心服务器单相浸没冷却过程的多尺度数值模拟,研究了浸没腔体液流组织对服务器发热器件的散热影响。建立的多尺度模型既可以考虑热量在芯片级上的分布,也可以考虑浸没腔级的冷却流体组织对温度分布的影响,是优化数据中心冷却效果的关键技术,可

为下一代数据中心设计并部署一个高效的冷却系统提供解决方案。

1 多尺度模型构建

如图 1 所示,单相浸没液冷数据中心液冷机房主要由浸没冷却腔、浸没服务器及冷却系统组成,其房间级、浸没腔级、服务器级与风冷机房类似,在几

何尺寸上呈现多尺度的特点。然而,风冷机房中各机柜是相互影响的,机房气流分布也受到机柜摆放、机柜结构、冷热通道布置的影响。单相浸没液冷机房中每个浸没腔体是独立的,各腔体的热量由冷却水带走,各腔体的相互影响可以忽略。因此,对于单相浸没液冷数据中心多尺度模型的研究仅涉及浸没冷却腔体到浸没服务器级。

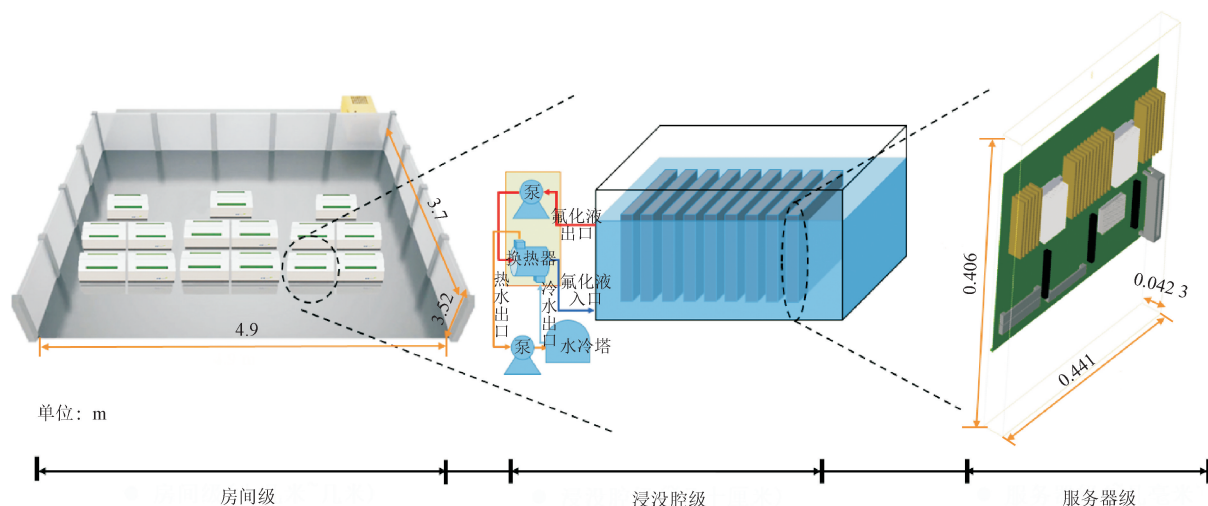


图 1 单相浸没液冷数据中心的多尺度模型

Fig. 1 Multiscale model of single-phase immersion cooling

图 1 浸没腔体中包含 15 台服务器,服务器模型由开放计算项目中的 Olympus 服务器详细模型简化得到,包含 2 个 CPU 散热组件、24 个双列直插内存模块 (DIMMs) 单元和 1 个平台控制器中枢 (PCH) 组件。为保证更多液体从服务器内部流过,采用密封板对服务器之间的间隙进行密封处理。研究所采用的冷却液为 FC-40 单相冷却液,其导热系数为 $0.065 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 。

CPU 散热器组件包括各发热元件以及由嵌入式铝制基底和平肋片组成的集成散热器。选用网格热阻模型模拟双热阻芯片封装模型,主要封装热阻包括芯片节点到壳体的热阻 R_{ja} 、节点到壳体的热阻 R_{jc} 、芯片节点到印刷电路板的热阻 R_{jb} ^[21]。由于 R_{ja} 很难应用于芯片节点温度的计算,因此在实际应用时,更多地采用节壳热阻 R_{jc} 和节板热阻 R_{jb} 评价器件的散热能力。选用 FF665 封装型号的芯片热阻值进行模拟^[22],其中 $R_{jb}=3.2^\circ\text{C}/\text{W}$, $R_{jc}=0.13^\circ\text{C}/\text{W}$ 。

对于多尺度系统采用覆盖所有尺度的方法称为全场模拟方法。对于大型数据中心来说,全场仿真方法因其巨大的复杂性和计算时间耗费量大而受到应用限制。本文对数据中心进行多尺度模拟研究,

每个层次均采用三维计算流体动力学/传热模拟,并将本层次数值结果作为下一层次模拟的边界条件,使每一层级计算结果耦合。单相浸没液冷数据中心多尺度模型具体实施方法如图 2 所示。

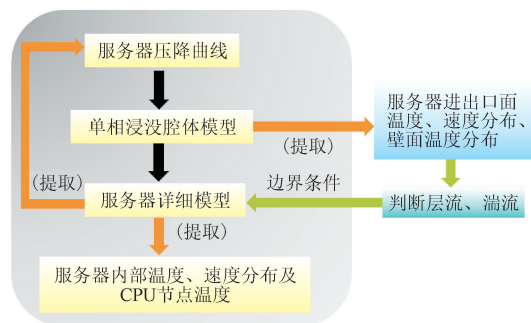


图 2 单相浸没液冷数据中心多尺度模型实施方法

Fig. 2 Implementation method of single-phase immersion cooling data center multiscale model

先由服务器详细模型得到压降阻力曲线,输入到浸没腔体模型中;再将浸没腔体仿真得到的服务器级计算结果作为边界条件,提取到服务器层级的仿真中,根据服务器入口参数选择层流或者湍流模型;最后开展服务器层级仿真,得到服务器内部温度

和速度分布以及芯片节点温度。通过构建数据中心浸没腔-服务器的多尺度模型,能够显著降低计算资源,实现全场的快速求解,且可精确反应出浸没腔体在不同运行参数下的流体分布对服务器芯片节点温度的影响。

2 数值模型描述

2.1 假设及控制方程

采用雷诺数描述浸没冷却腔体及服务器的入口流动状态^[22],表示如下

$$Re = \rho v D / \mu \quad (1)$$

式中: ρ 、 v 、 μ 分别为冷却液的密度、入口速度和动力黏度; D 为水力直径,可表示为

$$D = 2bh / (b + h) \quad (2)$$

式中: b 为矩形流通面的宽度,取 0.441 m; h 为矩形流通面的高度,取 0.042 m。

在光滑管黏性流动中,临界 Re 约为 2 300^[23]。虽然将 $Re = 2 300$ 作为层流和湍流的分界值具有一定局限性,但对于特定的实际结构,确定层流和湍流的转捩点需要采用直接数值模拟(DNS)方法,而对于本文复杂的几何结构,DNS 计算量非常庞大,较难实现。针对本文算例,验证得到当 $Re = 2 300$ 时,采用层流模型和 SST 湍流模型得到的芯片节点温度分别为 83.21、84.37 °C,相差不大。因此,对于工程问题,当过渡区域层流/湍流的分界线不够明确时,可采用 SST $k-\omega$ 湍流模型^[24]平衡计算成本和精度,其控制方程如下

$$\frac{\partial(\rho u_j k)}{\partial x_j} = \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \beta^* \rho \omega k + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\eta + \frac{\eta_t}{\sigma_{k2}} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j \omega)}{\partial x_j} = & \alpha_2 \frac{\omega}{k} \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \beta_2 \rho \omega^2 + \\ & \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\eta + \frac{\eta_t}{\sigma_{\omega 2}} \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + \rho \sigma_{\omega 2} \frac{2}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \end{aligned} \quad (4)$$

式中: u 为速度; ρ 为密度; i, j 为空间坐标,取为 1~3; k 为湍动能; ω 为单位湍动能的耗散率; η 为动力黏度; τ_{ij} 为湍流应力; β^* 为湍流常数,取 0.09; η_t 为湍流动力黏度, $\eta_t = \rho k / \omega$; σ_{k2} 为湍动能的普朗特数,取为 1.0; $\sigma_{\omega 2}$ 为湍动能耗散率的普朗特数,取为 1.168;常数 α_2 、 β_2 分别取 0.440 4 和 0.082 8。

2.2 边界条件

为获得多尺度模拟结果,对浸没腔体和服务器分别进行几何建模。在浸没腔体仿真中,将服务器详细模型计算的压降曲线作为浸没腔级多孔介质模型的输入条件。服务器入口速度设置为 0.005 ~

0.050 m/s,以 0.005 m/s 为间隔取 10 个点,其压降随着入口速度的变化如图 3 所示。将得到的压降曲线输入到浸没腔体多孔介质模型中,作为流体流过服务器的压降曲线。

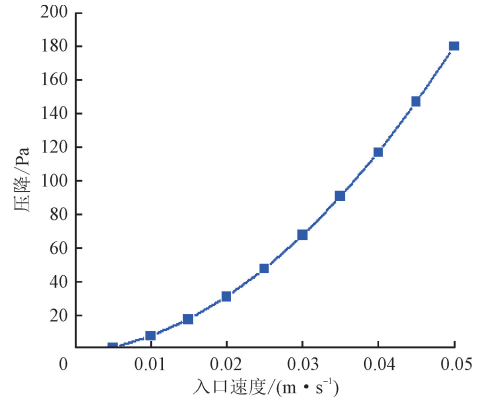


图 3 单相浸没液冷服务器的压降曲线

Fig. 3 Pressure drop curve of single-phase immersion cooling server

在液冷数据中心单相浸没腔体模型建立过程中,设计了 4 种常见的流量分配方式:出入口异侧布置、出入口同侧布置、分配腔室、分配腔室+分配歧管,如图 4 所示。绿色部分为服务器,黑色部分为各服务器间的隔板。给定液体入口速度及温度,腔体四周为绝热壁面,出口为自由流出。服务器为多孔介质模型,内部结构无需详细建模。根据输入流量与阻力的关系,采用 Icepak 仿真软件从阻力压降曲线拟合出多孔介质模型参数。

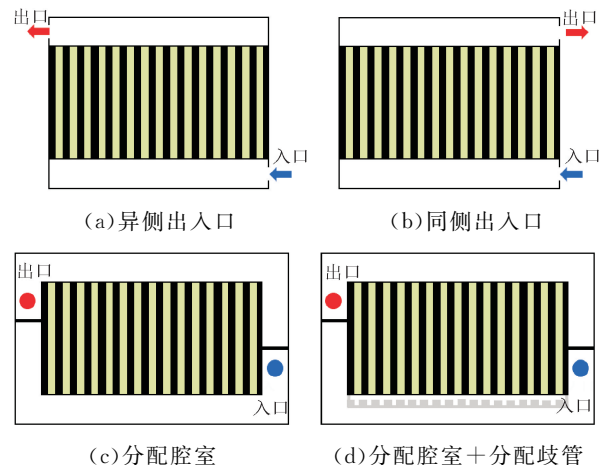


图 4 单相浸没腔体的 4 种流量分配方式

Fig. 4 Four types of single-phase immersion cooling tank flow distribution methods

2.3 网格独立性验证

为验证单相浸没腔体的网格独立性,在入口速

度为 1.13 m/s、入口温度为 20 °C、每个服务器功耗为 300 W 的工况下,通过改变网格数,得到服务器出口处点 1、点 2、点 3 的温度及服务器平均入口速度随网格的变化情况,如图 5 所示。由图可见,网格数达到 511 862 后,各变量不再随着网格数变化,因此选择该网格数作为后续计算参数。

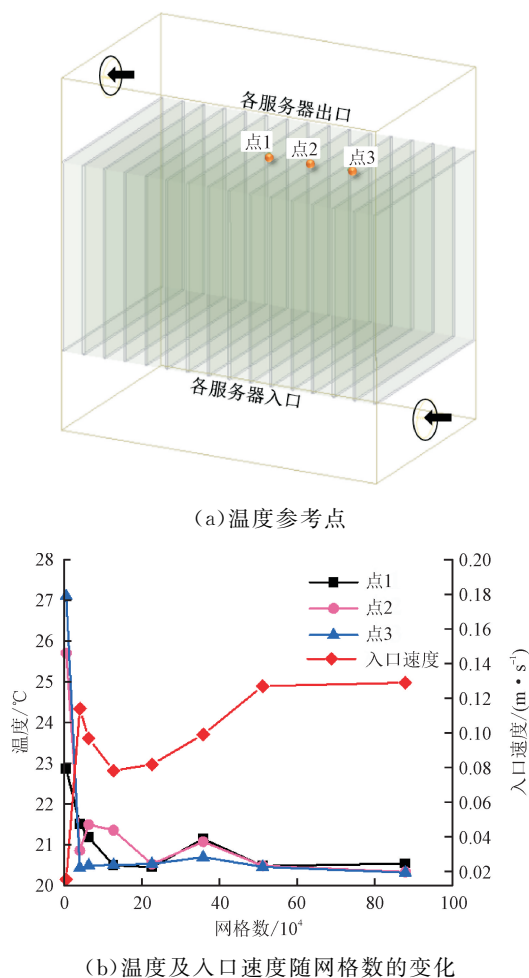


Fig. 5 Verification of mesh independence

2.4 模型验证

为了验证浸没腔体仿真模型的有效性,将本文仿真结果与文献[25]的浸没式冷却实验结果、文献[14]的仿真结果进行对比分析。文献[14]中,仿真采用的是层流模型。本文针对不同区域,采用层流模型或 SST 湍流模型,基于相同的几何尺寸、结构及工况,通过数值仿真模拟了文献[25]的实验过程。

图 6 为单相浸没腔体模型验证结果,图中给出了热源平均温度的仿真结果与实验数据的对比。由于实验过程中不可避免的测量误差、材料物性参数设置差别以及将模拟热源简化为具有均匀热流密度的体热源等原因,导致本文的仿真结果与文献中的

实验结果和仿真结果出现偏差,其中不同入口速度下的实验结果与仿真结果的最大偏差为 4.3%。综上所述,尽管模拟结果与实验结果之间存在小幅度偏差,但仍处于可接受范围,因此认为当前模型是可靠且准确的,后续相关研究也可基于此模型展开。

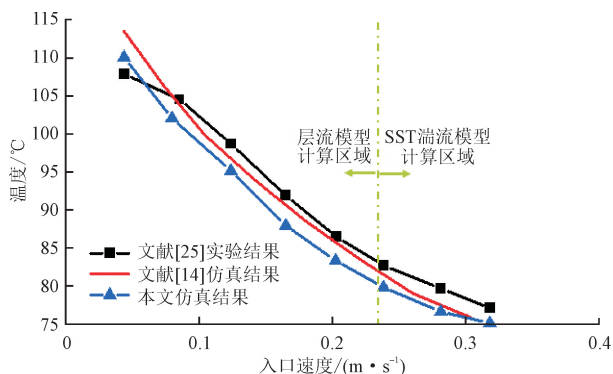


Fig. 6 Verification of single-phase immersion tank

3 结果与讨论

3.1 流量分配方式对单相浸没腔体散热的影响

流量分配方式是影响单相浸没腔体散热性能的重要因素,合理的流量分配能够显著提高单相浸没冷却的散热效率。流量分配是指冷却液在浸没腔体中的流动路径和流量大小的控制方式。在流量分配方式中,出入口异侧或同侧布置时,腔体结构更加紧凑,布管更方便。分配腔室的存在能够避免冷却液在进入散热腔体时形成不均匀分布,与此同时,在进液腔中搭配分配歧管可提高并控制冷却液进入服务器的流速,更有利于对不同热流密度的服务器进行有效冷却。在腔体冷却液入口流量为 0.008 7 m³/s、流速为 1.7 m/s、入口温度为 20 °C、单个服务器功耗为 800 W 时,得到 4 种不同腔体流量分配方式下浸没腔体的液流组织、腔体服务器进口截面的速度及服务器出口截面的温度分布,如图 7 所示。其中,腔体服务器进、出口截面位置在图 5(a)中进行了标注,腔体液流组织在不同结构下对应的出、入口位置见图 4。

为评价冷却液流量在各服务器入、出口分布的均匀性,分别定义 15 个服务器入、出口速度和出口温度的标准差(即不均匀性系数)为 σ_{in} 、 σ_{out} 、 $\sigma_{out,T}$,表达式如下

$$\sigma_{in} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (v_{i,in} - \bar{v}_{in})^2} \quad (5)$$

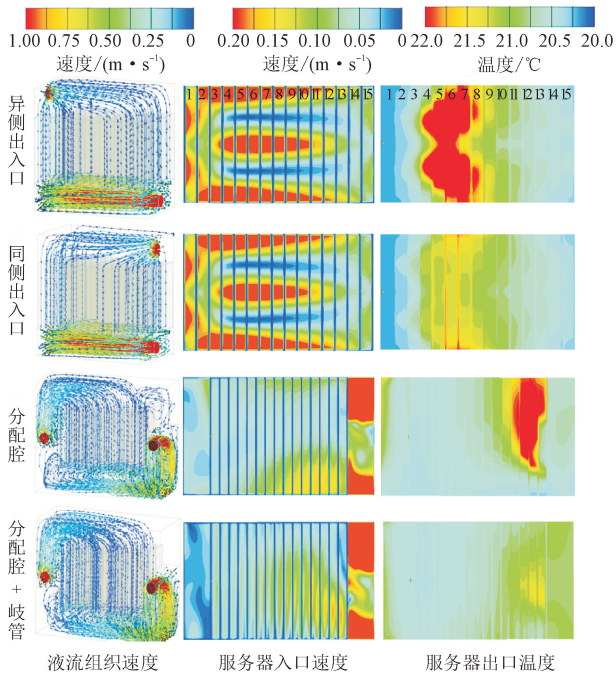


图 7 不同流量分配方式下腔体和服务器的流动换热性能
Fig. 7 Flow and heat transfer performance of the immersion tanks and servers under different flow distribution methods

$$\sigma_{\text{out}} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (v_{i,\text{out}} - \bar{v}_{\text{out}})^2} \quad (6)$$

$$\sigma_{\text{out},T} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (T_{i,\text{out}} - \bar{T}_{\text{out}})^2} \quad (7)$$

式中: N 为服务器个数; $v_{i,\text{in}}$ 、 $v_{i,\text{out}}$ 、 $T_{i,\text{out}}$ 分别为第 i 个服务器的平均入口速度、出口速度和出口温度; $\bar{v}_{\text{in}}$ 、 $\bar{v}_{\text{out}}$ 、 $\bar{T}_{\text{out}}$ 分别为所有服务器的平均入口速度、出口速度和出口温度。

图 8 给出了不同分配方式下,服务器出入口截面的入口速度、出口温度和均匀性系数。

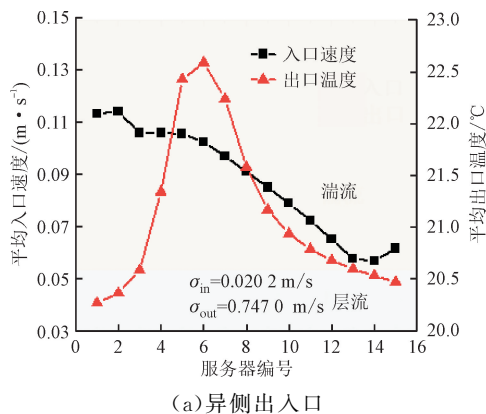
由图 8(a)可见,当出入口分布在腔体异侧时,液体由腔体底部流入,经过浸没服务器内部后,再由

顶部流出。平均入口速度沿着服务器 1~15 呈现整体下降趋势,第 14 个服务器平均入口速度下降达到最低,为 0.056 7 m/s,此时的入口速度不均匀性较高,达到 0.02 °C 左右。服务器出口位置的温度分布也极不均匀,第 6、7、8 个服务器的出口温度均超过 22 °C,出口处的不均匀度达到 0.747 °C。

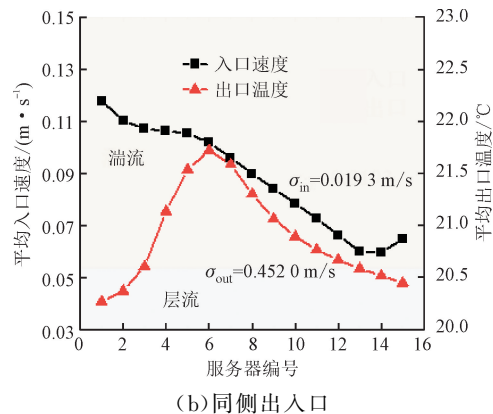
由图 8(b)可见,当出入口分布在腔体同侧时,由于该分配方式的入口位置与前种分配方式一致,入口速度分布几乎未发生变化,也具有较高的不均匀性。由于浸没腔体的出口与入口位置在腔体同侧,服务器出口处的温度均匀性有所提高,此时的 σ_{out} 为 0.473 m/s。其中,第 6 个服务器的出口温度最高,为 21.7 °C。

如图 8(c)所示,对于有分配腔的分配方式,入口速度的不均匀性大大降低,此时的 σ_{in} 约为 0.01 m/s,相较于没有分配腔的方式,不均匀度降低了 50%。此时,各服务器平均入口速度均有所降低,最高、最低平均速度分别为 0.068、0.037 m/s。由图 7 液流组织可知,浸没腔体右上角处产生了热回流和滞留区,导致该区域的服务器不能得到有效冷却,因此在服务器出口截面右上角区域产生了局部热点区域,此时第 13、14 个服务器出口处的平均温度最高达到 21.9 °C。

由图 8(d)可见,当采用分配腔+歧管流量分配方式时,液体先经过入口流入分配腔中,再由入口处的分配歧管进入到各服务器中。该分配方式下,各服务器入口处的平均速度与有分配腔的方式相类似,各服务器的入口速度差异较小, σ_{in} 约为 0.01 m/s,服务器最大平均入口速度为 0.086 m/s,较仅有分配腔的方式提高了 26.5%。同时,该分配方式出口温度均匀性最高, σ_{out} 约为 0.19 m/s,较异侧分布方式的不均匀性降低了 74.67%。



(a) 异侧出入口



(b) 同侧出入口

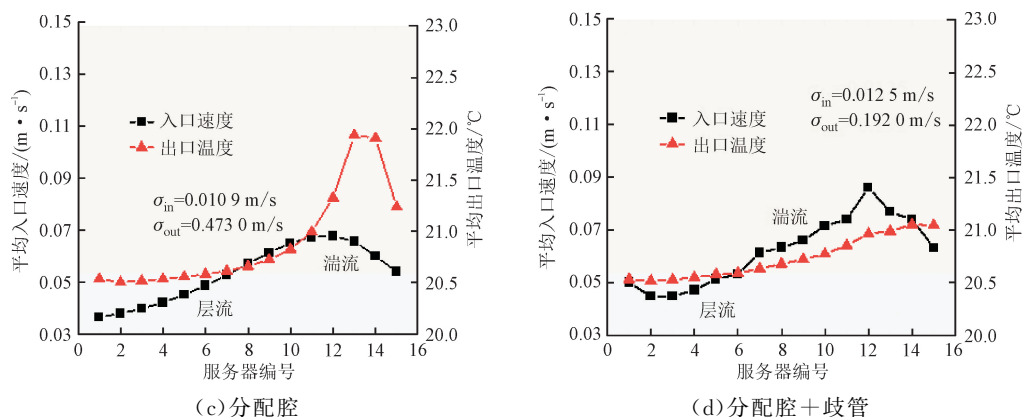


图 8 不同流量分配方式下各服务器的入口速度、出口温度和不均匀性系数

Fig. 8 Inlet velocity, outlet temperature and non-uniformity coefficients for each server under different flow distribution methods

综上所述,入口服务器速度分配均匀性由好到次排序为有分配腔结构、分配腔+歧管结构、同侧出入口、异侧出入口。首先,对于有分配腔的结构,流体从入口进入分配腔时,由于腔体截面显著增大,导致流速急剧降低,流体动能转化为压力能,降低了入口扰动的影响。分配腔作为缓冲区域,能够平衡入口处的局部高压和低压区域,使得腔体内的静压分布趋于均匀。各服务器入口处的压力梯度减小,流速分布更加均匀。对于分配腔+分配歧管结构,分支结构导致各支路的流动阻力不一致,且对于黏度较高的氟化液,更容易放大因黏性阻力引起的流动不均。同侧进出口速度分配的均匀性略优于异侧进出口,主要原因是,同侧结构的对称性较好,压力分布均匀,湍流混合效果良好,从而提升了各服务器出入口流速分布均匀性。

值得注意的是,虽然此时腔体入口速度下腔体内流动为湍流流动,但对于不同的分配方式,各服务器的入口速度不同,在异侧和同侧出入口的分配方式下,各服务器入口速度均高于 0.0547 m/s ,因此

对这两种方式下多尺度模型中服务器详细模型的计算采用 SST 湍流模型。对于有分配腔及分配腔+分配歧管的这两种方式,有部分服务器入口速度低于 0.0547 m/s ,此时对这部分服务器详细模型采用层流模型进行计算。当腔体冷却液入口速度为 1.7 m/s 时,对于分配腔结构,第 1~7 服务器均采用层流模型计算;对于分配腔+分配歧管结构,第 1~6 服务器均采用层流模型计算。

表 1 将不同分配方式下最低入口速度服务器的平均出入口速度进行了汇总。由表可知,无分配腔的分配方式使得位于腔体靠后位置服务器的入口速度最低,中间位置服务器的出口温度最高。分配腔分配方式下,使位于腔体靠前位置服务器的入口速度最低,靠后位置服务器的出口温度最高。尽管分配腔+分配歧管的分配方式以降低入口速度的代价换取了入口速度的均匀性,但服务器的最高平均出口温度仍然保持最低。由此可知,分配腔体+歧管的分配方式既具有均匀分配的特点,也不会使得服务器所处的热环境变差。

表 1 不同流量分配方式下腔体的流动与换热参数

Table 1 Flow and heat transfer parameters of the immersion tank under different flow distribution methods

分配方式	入口速度最低的 服务器编号	最低平均入口 速度/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	出口温度最高的 服务器编号	最高平均 出口温度/ $^{\circ}\text{C}$	$\sigma_{\text{in}}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	$\sigma_{\text{out}}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$
异侧出入口	14	0.057	6	22.59	0.020 2	0.747
同侧出入口	14	0.060	6	21.72	0.019 3	0.452
分配腔	1	0.037	13	21.94	0.010 9	0.473
分配腔+歧管	2	0.044	14	21.05	0.012 5	0.192

3.2 流量分配方式对芯片节点温度的影响

根据上文分析,选择出口温度最高的服务器,研究其内部速度和温度的分布情况。即异侧和同侧出

入口选择第 6 个服务器,分配腔和分配腔+歧管分别选择第 13、第 14 个服务器。根据浸没腔体的计算结果,提取服务器出入口及四周壁面的温度作为

第一类边界,提取服务器入口处的速度条件和出口压力条件输入服务器详细模型,设置服务器内壁为无滑移壁面边界。在浸没腔体中,单个服务器的功耗为 800 W,其中单个 CPU 功耗为 325 W,PCH 组件功耗为 30 W,DIMMs 总功耗为 120 W。

采用单相浸没腔体多尺度模型开展计算,得到不同流量分配方式对服务器芯片温度的影响,如图 9 所示。由图可见,服务器内部的速度分布受入口速度分布的影响较大,尽管浸没腔体的入口速度相同,但对于不同的流量分配方式,相同位置服务器的入口速度分布并不相同。由此可见,为捕捉服务器入口速度非均匀分布特性,需采用多尺度模型。

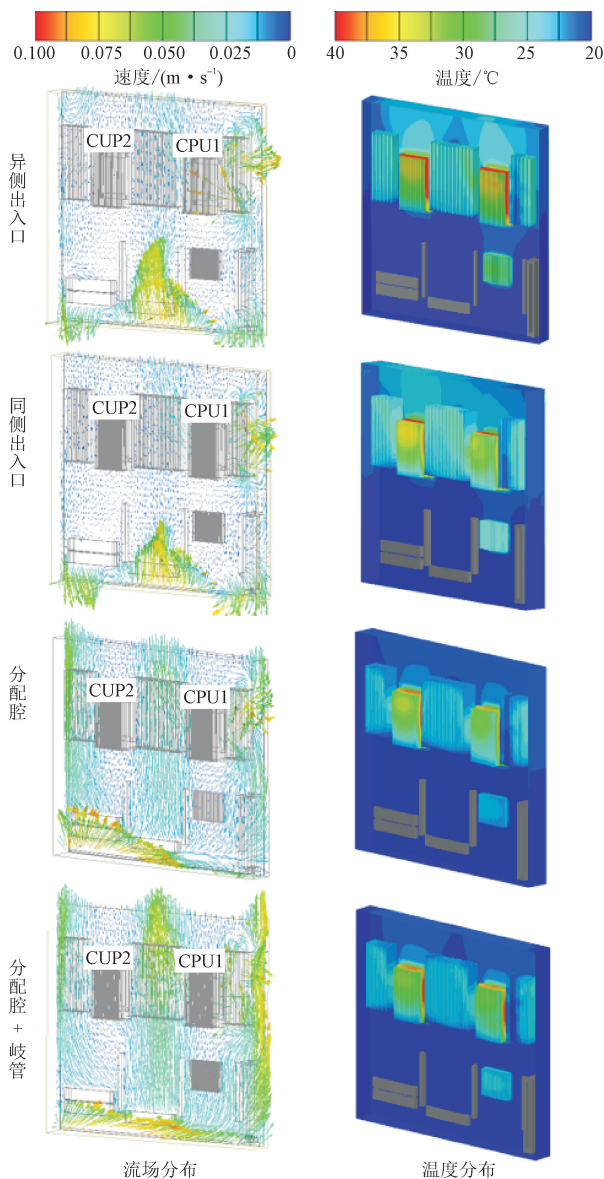


图 9 不同流量分配方式下服务器的流场和温度分布

Fig. 9 Flow field and temperature contour of servers under different flow distribution methods

由图 9 可见,对于无分配腔(即异侧、同侧出入口)结构,由于其均匀性较差,流体流入腔体后流动截面突然扩大使得压力降低,容易产生流动分离和涡流,导致服务器入口处出现回流。大部分用于冷却发热器件的流体回流至腔体中,使得服务器内部组件不能得到有效冷却。同时,邻近出口的右上角区域也出现回流区,而对于异侧出入口的分配方式,回流情况则更为严重,使得 CPU1 芯片出现再加热,导致该芯片的节点温度上升。有分配腔的流量分配方式提高了入口速度的均匀性,避免了入口处出现回流,使得服务器内部的流场分布更加均匀,换热能力大大提高,芯片节点温度也更低。而对于仅有分配腔的结构,由于没有分配歧管的引导,流体在分配腔内的流动方向无法得到有效引导,使得几何形状突扩的出口区域形成局部低压区,导致回流。同时搭配有歧管的分配方式可使得右上角区的回流区明显减弱,CPU1 节点温度降低。在这两种分配方式中,左侧入口速度均高于右侧入口速度,导致左侧芯片 CPU2 的节点温度低于右侧 CPU1 芯片的节点温度。

图 10 统计了各分配方式下芯片节点温度。由图可见,异侧出入口、同侧出入口、分配腔、分配腔+歧管这 4 种流量分配方式下,各服务器 CPU1、CPU2 的节点温度分别为 88.21 和 86.92 °C、85.95 和 86.87 °C、83.75 和 84.99 °C、84.50 和 84.64 °C。相较于异侧出入口方式,分配腔+歧管的分配方式使得芯片温度降低了 3.71 °C。若以芯片节点温度小于 85 °C 为安全工作温度,当服务器功耗为 800 W、浸没腔体总功耗为 12 kW、腔体入口速度为 1.7 m/s 时,选择分配腔和分配腔+歧管的分配方式,能将芯片工作维持在安全温度内。

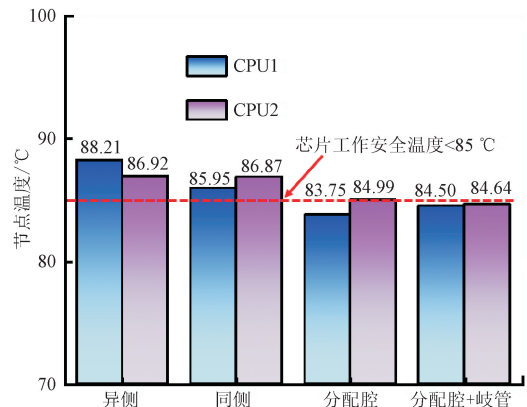


图 10 不同流量分配方式下 CPU 芯片的节点温度

Fig. 10 Chip node temperature under different flow distribution methods

3.3 腔体流体进口温度对芯片节点温度的影响

在单相浸没冷却中,较低的入口温度有助于更高效散热,从而降低芯片的温度,确保系统的稳定性和可靠性。然而,入口温度过低会引起冷却系统能耗增加,不利于数据中心的经济运行。为了研究腔体进口流体温度对 CPU 芯片的影响,同时与空气冷却进行对比,设置服务器功耗为 300 W。此时,服务器功耗降低,浸没腔体的入口速度也相应降低。设置腔体入口速度为 0.646 m/s,选择分配腔+歧管的分配方式,采用多尺度模型研究芯片节点温度随腔体进口流体温度的变化规律。

由腔体模型求解 $k-\epsilon$ 湍流方程,得到的各服务器平均入口速度均低于 0.054 7 m/s,因此在多尺度仿真方法中,选用层流模型求解服务器内部的流动与换热过程。腔体液体入口温度 $T_{f, \text{tank_in}}$ 为 20~45 °C 时,第 14 号服务器芯片 CPU1 和 CPU2 的节点温度 T_{CPU1} 和 T_{CPU2} 随流体入口温度的变化如图 11 所示,可见其呈正比关系。

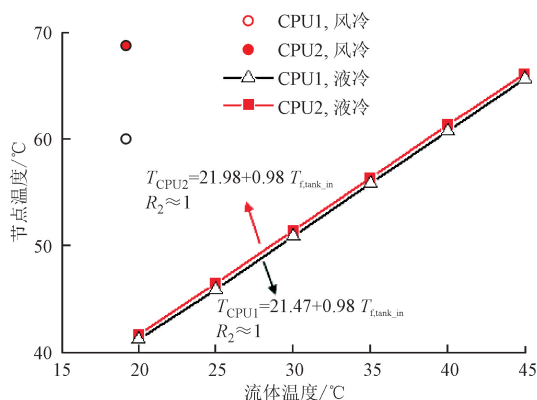


图 11 不同腔体进口流体温度下芯片的节点温度

Fig. 11 Chip node temperature under different tank inlet liquid temperatures

由图 11 可见,当进口流体温度为 20 °C 时,此时 CPU1 和 CPU2 节点温度均为 41 °C 左右,远远低于芯片安全工作温度阈值。当流体温度增加到 45 °C 时,芯片节点温度达到 66 °C。此时,由于仅改变了腔体进口的流体温度,而温度变化不大对流体物性的影响较小,且在浸没腔体湍流流动换热下自然对流换热占比较少,因此服务器等效对流换热系数几乎不会变化,腔体进口流体温度与芯片节点温度之间满足线性拟合关系。拟合得到 CPU1 和 CPU2 节点温度 T_{CPU1} 、 T_{CPU2} 与腔体进口流体温度 $T_{f, \text{tank_in}}$

之间的关系见图 11,直线的决定系数 R^2 约为 1,表明模型能够完全拟合数据。根据计算结果,当腔体流体的入口温度高达 64 °C 时,芯片节点温度刚好达到安全阈值 85 °C。由此可知,当单个服务器功耗为 300 W、整个浸没腔体功耗为 4.5 kW 时,采用进口速度为 0.646 m/s、温度不高于 64 °C 的氟化液可使芯片工作在安全温度以下。在液冷数据中心的实际运行中,液体温度一般不会达到 64 °C,而根据研究结果,当液体温度维持在 35 °C 左右时,仍能保持低功耗芯片的高效运行。然而,对于风冷数据中心, CPU 芯片温度远远高于液冷服务器的芯片工作温度^[26]。因此,相较于风冷数据中心,液冷数据中心能以更低的进液速度使得芯片工作温度更低,且具有更强换热能力。

3.4 腔体流体进口速度对芯片节点温度的影响

对于单相浸没散热,流体流速是影响冷却效果的重要指标。流速的增加能够改善流体与浸没组件之间的对流换热以增强散热性能,从而得到更均匀的温度分布和冷却效果。然而,流速过高会引起系统振动、摩擦损失增加及所需泵功增大。为了明晰腔体流速对芯片散热的影响,采用多尺度模型研究了分配腔+歧管分配方式下、腔体流体进口温度为 20 °C 时,芯片节点温度随流体进口速度的变化规律。为使腔体中流体的流动仍为湍流流动,通过计算雷诺数,将入口速度设为 0.100~0.646 m/s,上述范围内的仿真结果表明,服务器内部的流动均为层流,因此选取层流模型开展计算。图 12 展示了将第 14 个服务器作为研究对象时,不同腔体进口流体速度下芯片的节点温度。

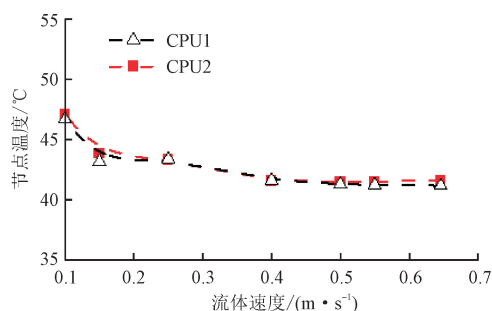


图 12 不同腔体入口速度下芯片的节点温度

Fig. 12 Node temperature under different inlet liquid velocities

如图 12 所示,芯片节点温度随着腔体入口速度的升高而整体出现下降趋势。当腔体入口速度为 0.1 m/s 时,芯片节点温度为 46 °C;当腔体入口速度

提高至 0.646 m/s 时,芯片节点温度降低至 41℃。这是因为,流体入口速度的提高增大了液体与芯片换热的等效对流换热系数,加快了芯片散热。由于等效对流换热系数与腔体入口速度成非线性关系,因此当入口速度为 0.400~0.646 m/s 时,芯片节点温度随着入口速度的增加,降低速度放缓。由此可知,当腔体入口速度高于 0.400 m/s 时,采用提高腔体入口速度的方法,并不会使得芯片的节点温度显著降低。

4 结 论

本文建立了单相浸没液冷数据中心多尺度数值仿真模型,研究了 4 种不同浸没腔体流量分配方式对多尺度模型的影响,同时利用多尺度数值模型,研究了不同腔体进口液体温度、流速等条件下芯片节点温度的变化,得到以下主要结论。

(1)对比分析单相浸没冷却仿真模型与实验数据,结果表明,仿真结果与实验结果的最大偏差为 4.3%,验证了模型的准确性和可靠性。该模型能够有效预测浸没冷却系统中的流动与传热特性,可为优化冷却性能提供理论依据。

(2)采用分配腔+分配歧管的分配方式,既能维持各服务器入口温度、速度的均匀性,也能有效提高服务器芯片级的冷却效率。根据多尺度模型仿真结果,相较于异侧进出口,分配腔+分配歧管方式下出口速度的不均匀性降低了 74.67%,芯片节点温度降低了 3.71℃。

(3)采用多尺度模型研究了分配腔+分配歧管方式下芯片节点温度随腔体进口流体温度和速度的变化规律,结果表明,芯片节点温度与腔体进口流体温度呈正比线性变化,与腔体进口流体速度成负增长关系。在服务器单功耗为 300 W、流体速度为 0.646 m/s 时,液体温度维持在 35℃,能够保证芯片的高效运行。

参考文献:

- [1] WANG Siqi, TU Rang, CHEN Xianzhong, et al. Thermal performance analyses and optimization of data center centralized-cooling system [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2023, 222: 119817.
- [2] ABBAS A M, HUZAYYIN A S, MOUNEER T A, et al. Thermal management and performance enhancement of data centers architectures using aligned/staggered in-row cooling arrangements [J]. *Case Studies in Thermal Engineering*, 2021, 24: 100884.
- [3] 左春帅,李凤勇,张学友. 数据中心冷却架构对空调制冷效果影响的研究 [J]. *建筑节能*, 2024, 52(12): 101-106.
- [4] ZUO Chunshuai, LI Fengyong, ZHANG Xueyou. Influence of data center cooling architecture on the cooling effect of air conditioner [J]. *Building Energy Efficiency*, 2024, 52(12): 101-106.
- [5] DHARANEGOWDA C G, GOWDA B S. Investigation of single-phase immersion cooling for modern data centers [J]. *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences*, 2023, 111(2): 141-153.
- [6] LIU Wei, LIAN Song, FANG Xin, et al. An open-source and experimentally guided CFD strategy for predicting air distribution in data centers with air-cooling [J]. *Building and Environment*, 2023, 242: 110542.
- [7] 吴丹萍. 液冷技术在数据中心的应用分析 [J]. *中国设备工程*, 2024(21): 222-224.
- [8] WU Danping. Application analysis of liquid cooling technology in data centers [J]. *China Plant Engineering*, 2024(21): 222-224.
- [9] 刘圣春,徐智明,李雪强,等. 单相浸没式液冷箱体关键参数的仿真研究 [J]. *制冷学报*, 2023, 44(2): 159-166.
- [10] LIU Shengchun, XU Zhiming, LI Xueqiang, et al. Simulation study on key parameters of single-phase liquid-cooling cabinet in data centers [J]. *Journal of Refrigeration*, 2023, 44(2): 159-166.
- [11] PAMBUDI N A, YUSUF A M, SARIFUDIN A. The use of single-phase immersion cooling by using two types of dielectric fluid for data center energy savings [J]. *Energy Engineering*, 2021, 119(1): 275-286.
- [12] QIU Delong, CAO Liqiang, WANG Qidong, et al. Experimental and numerical study of 3D stacked dies under forced air cooling and water immersion cooling [J]. *Microelectronics Reliability*, 2017, 74: 34-43.
- [13] 冯帅,王国岩,何嘉俊,等. 浸没式交换机液冷技术仿真与实验 [J]. *制冷学报*, 2021, 42(3): 135-144.
- [14] FENG Shuai, WANG Guoyan, HE Jiajun, et al. Experiment and numerical simulation of immersion liquid-cooled switch [J]. *Journal of Refrigeration*, 2021, 42(3): 135-144.
- [15] SUN Xinshan, LIU Zhan, JI Shenrui, et al. Experimental study on thermal performance of a single-phase immersion cooling unit for high-density computing power data center [J]. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 2025, 112: 109735.
- [16] CHHETRI A, KASHYAP D, MALI A, et al. Numerical simulation of the single-phase immersion cool-

- ing process using a dielectric fluid in a data server [J]. *Materials Today: Proceedings*, 2022, 51 (Part 3): 1532-1538.
- [13] LIONELLO M, RAMPAZZO M, BEGHI A, et al. Graph-based modelling and simulation of liquid immersion cooling systems [J]. *Energy*, 2020, 207: 118238.
- [14] HUANG Yongping, GE Junlei, CHEN Yongping, et al. Natural and forced convection heat transfer characteristics of single-phase immersion cooling systems for data centers [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2023, 207: 124023.
- [15] KUNCORO I W, PAMBUDI N A, BIDDINIK A M K, et al. Optimization of immersion cooling performance using the Taguchi method [J]. *Case Studies in Thermal Engineering*, 2020, 21: 100729.
- [16] CHENG C C, CHANG Pochun, LI H C, et al. Design of a single-phase immersion cooling system through experimental and numerical analysis [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2020, 160: 120203.
- [17] QI Wenliang, LIU Tingting, ZHANG Zichun, et al. Effect of direct liquid cooling technology with flow guide integration on avionics devices thermal and electrical performance [J]. *Journal of Thermal Science and Engineering Applications*, 2023, 15(2): 021004.
- [18] LIU Shengchun, XU Zhiming, WANG Zhiming, et al. Optimization and comprehensive evaluation of liquid cooling tank for single-phase immersion cooling data center [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2024, 245: 122864.
- [19] LI Xueqiang, GUO Shentong, SUN Haiwang, et al. Experimental study of the performance of liquid cooling tank used for single-phase immersion cooling data center [J]. *Case Studies in Thermal Engineering*, 2024, 63: 105386.
- [20] WANG Ningbo, GUO Yanhua, HUANG Congqi, et al. Multi-scale collaborative modeling and deep learning-based thermal prediction for air-cooled data centers: an innovative insight for thermal management [J]. *Applied Energy*, 2025, 377(Part B): 124568.
- [21] 申海东, 张泽, 陈科雯, 等. 基于双热阻模型的典型芯片封装热分析及评估方法 [J]. *装备环境工程*, 2018, 15(7): 10-14.
- SHEN Haidong, ZHANG Ze, CHEN Kewen, et al. Thermal analysis and evaluation method of typical chip package based on double thermal resistance model [J]. *Equipment Environmental Engineering*, 2018, 15(7): 10-14.
- [22] 王永康, 张洁, 张宇, 等. ANSYS Icepak 电子散热基础教程 [M]. 2 版. 北京: 电子工业出版社, 2019.
- [23] 陶文铨. 传热学 [M]. 5 版. 北京: 高等教育出版社, 2019.
- [24] MENTER F R. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications [J]. *AIAA Journal*, 1994, 32(8): 1598-1605.
- [25] LUO Qingyi, WANG Changhong, WEN Haiping, et al. Research and optimization of thermophysical properties of sic oil-based nanofluids for data center immersion cooling [J]. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2022, 131: 105863.
- [26] GAWANDE C A, NAKATE S M, CHAVAN P. Temperature analysis of intel server by using CFD and experimentation [J]. *International Research Journal of Engineering and Technology*, 2016, 3(6): 2473-2478.
- (编辑 杜秀杰 李慧敏)